

ПОВНА ПОТУЖНІСТЬ ТА МАКСИМАЛЬНИЙ ККД ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

Артеменко М. Ю., доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Одним із перспективних технічних напрямів енергозбереження в трифазних системах живлення є зниження втрат та відновлення якісних показників електроенергії на клеммах потужних споживачів шляхом застосування паралельних активних фільтрів (ПАФ) з можливістю формування оптимальних вхідних струмів в умовах нестабільності навантаження та параметрів вхідної напруги. При цьому важливо коректно визначити повну потужність чотирипровідної системи живлення, оскільки через неадекватність формули повної потужності невірно визначається і коефіцієнт потужності, внаслідок чого алгоритми керування активними фільтрами не забезпечують оптимального енергетичного режиму, що характеризується мінімумом втрат та одиничним коефіцієнтом потужності [1].

Розглянемо трифазну чотирипровідну систему живлення (рис. 1), що складається з трифазного джерела напруги синусоїдної форми, лінії передачі з відповідними активно-індуктивними опорами, несиметричного навантаження та паралельного активного фільтра.



Рисунок 1. Система живлення

Усталений синусоїдний процес в системі живлення з круговою частотою ω описується матрично-векторним рівнянням відносно трикоординатних комплексних векторів діючих значень фазних напруг та струмів

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{u}} - (\mathbf{R} + j\mathbf{X})\bar{\mathbf{i}}, \quad (1)$$

де $\mathbf{R} = r\mathbf{E} + r_n\mathbf{j}\mathbf{j}^T = \mathbf{R}^T$; $\mathbf{X} = \omega(L\mathbf{E} + L_n\mathbf{j}\mathbf{j}^T) = \mathbf{X}^T$ – симетричні матриці активних та реактивних опорів в прийнятій моделі лінії передачі; $\mathbf{j}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$; T – знак транспонування; $*$ – знак комплексного спряження;

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} V_A e^{j\varphi_A} \\ V_B e^{j\varphi_B} \\ V_C e^{j\varphi_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = \frac{\bar{\mathbf{v}} e^{j\omega t} + (\bar{\mathbf{v}} e^{j\omega t})^*}{\sqrt{2}}; \bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}.$$

Потужність втрат в лінії передачі

$$\Delta P = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)r + I_N^2 r_N = \mathbf{i}^T (r\mathbf{E} + r_N \mathbf{j}\mathbf{j}^T) \mathbf{i}^* = \mathbf{i}^T \mathbf{R} \mathbf{i}^*. \quad (2)$$

Потужність навантаження

$$P = \text{Re}(\bar{\mathbf{v}}^T \bar{\mathbf{i}}^*) = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}^*) - \bar{\mathbf{i}}^T \mathbf{R} \bar{\mathbf{i}}^* = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}^*) - \Delta P. \quad (3)$$

Виділимо в комплексних векторах діючих значень фазних напруг джерела та лінійних струмів вектори дійсних та уявних частин $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{u}_R + j\mathbf{u}_I$; $\bar{\mathbf{i}} = \mathbf{i}_R + j\mathbf{i}_I$, тоді екстремальна задача максимізації активної потужності трифазного навантаження при заданих напругах джерела та фіксованій потужності втрат в лінії передачі формалізується наступним чином:

$$\Delta P = (\mathbf{i}_R + j\mathbf{i}_I)^T \mathbf{R} (\mathbf{i}_R - j\mathbf{i}_I) = \mathbf{i}_R^T \mathbf{R} \mathbf{i}_R + \mathbf{i}_I^T \mathbf{R} \mathbf{i}_I = \text{const};$$

$$\text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}^*) = \text{Re}[(\mathbf{u}_R + j\mathbf{u}_I)^T (\mathbf{i}_R - j\mathbf{i}_I)] = \mathbf{u}_R^T \mathbf{i}_R + \mathbf{u}_I^T \mathbf{i}_I \rightarrow \max.$$

Результатом розв'язання аналогічної екстремальної задачі методом множників Лагранжа [2] є вектор оптимальних значень лінійних струмів

$$\bar{\mathbf{i}}_{onm} = \sqrt{\Delta P r / (\bar{\mathbf{u}}^T \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{u}}^*)} \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{u}} = \sqrt{\Delta P / (r \bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}_\sigma^*)} \bar{\mathbf{u}}_\sigma,$$

де комплексному вектору $\bar{\mathbf{u}}_\sigma = r \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{u}}$ відповідає вектор миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності

$$\mathbf{u}_\sigma(t) = \mathbf{u}(t) - \sigma_0 \frac{u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)}{3} \mathbf{j},$$

причому величина коефіцієнта послаблення $\sigma_0 = 3r_N / (r + 3r_N)$ в точності дорівнює такому, що мінімізує втрати енергії в лінії передачі чотирипровідної трифазної мережі при несинусоїдних фазних напругах [3].

Максимальна потужність навантаження

$$P_{\max} = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}_{onm}^*) - \Delta P = \sqrt{(\Delta P / r) \bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}_\sigma^*} - \Delta P. \quad (4)$$

Величина $\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}_\sigma^* / r = \bar{\mathbf{u}}^T \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{u}}^* = \bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}_0^* = P_0$ дорівнює потужності резистивного короткого замикання системи живлення, оскільки вектор струмів $\bar{\mathbf{i}}_0 = \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{u}}$ є розв'язком системи рівнянь (1) при $\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{0}; \mathbf{X} = \mathbf{0}$.

Таким чином, маємо кінцеву формулу для повної потужності:

$$S = P_{\max} = \sqrt{P_0 \Delta P} - \Delta P. \quad (5)$$

Активна потужність трифазного джерела в оптимальному режимі

$$P_{дж} = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}_{онт}^*) = \sqrt{P_0 \Delta P} \quad (6)$$

є середнім геометричним значенням потужностей втрат та потужності резистивного короткого замикання системи живлення.

Максимальний коефіцієнт корисної дії системи живлення досягається при формуванні оптимального значення вектора струмів трифазного джерела засобами активної фільтрації та визначається виразом:

$$\eta = P_{\max} / P_{дж} = (\sqrt{P_0 \Delta P} - \Delta P) / \sqrt{P_0 \Delta P} = 1 - \sqrt{\Delta P / P_0}. \quad (7)$$

Вектор напруг навантаження при оптимальних струмах джерела

$$\bar{\mathbf{v}}_{онт} = \bar{\mathbf{u}} - (\mathbf{R} + j\mathbf{X}) \bar{\mathbf{i}}_{онт} = \bar{\mathbf{u}} - \sqrt{\Delta P / P_0} (\mathbf{R} + j\mathbf{X}) \bar{\mathbf{u}}_{\sigma}$$

має фазові та амплітудні відмінності від вектора фазних напруг джерела, що доцільно враховувати при побудові алгоритмів керування засобами активної фільтрації, які розташовані безпосередньо на затискачах трифазного навантаження.

Перелык посилань

1. Czarnecki L. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation / L. Czarnecki, P. Haley // IEEE Trans. on Power Delivery. — 2015. — Vol.30. — No.1. — P. 53 — 63.
2. Артеменко М. Ю. Оптимізація енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром у несиметричному синусоїдному режимі / М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак, В. М. Михальський, С. Й. Поліщук // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 2. — С. 30 — 37.
3. Artemenko M. Yu. Minimization of Cable Losses in Three-Phase Four-Wire Systems by Means of Instantaneous Compensation with Shunt Active Filters / M. Yu. Artemenko, L. M. Batrak, S. Y. Polishchuk, V. M. Mykhalskyi, I. A. Shapoval // Proceedings of IEEE XXXIII International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology”. — Kyiv: KPI, 2013. — P. 359 — 362.

Анотація

Отримані нові формули для повної потужності та максимального ККД трифазної чотирипровідної системи живлення в синусоїдному режимі роботи, що можуть бути використані для побудови алгоритмів енергоефективного керування активних фільтрів.

Ключові слова: повна потужність, трифазна чотирипровідна система живлення.

Аннотация

Получены новые формулы для полной мощности и максимального КПД трехфазной четырехпроводной системы питания в синусоидальном режиме работы, которые могут быть использованы для построения алгоритмов энергоэффективного управления активных фильтров.

Ключевые слова: полная мощность, трехфазная система питания.

Abstract

New formulas for apparent power and the maximum power efficiency of a three-phase four-phase system in sinusoidal mode of operation were obtained that can be used to construct an energy-efficient control algorithms for active filters.

Keywords: apparent power, three-phase four-wire power system.